

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL**

**TEMA:
COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE ESTRUCTURAS
APORTICADAS DE HORMIGÓN ARMADO UTILIZANDO LOS MÉTODOS MODAL
ESPECTRAL (NEC 2015) Y TIEMPO HISTORIA DE ACELERACIONES
(PEDERNALES 2016)**

**AUTOR:
JOHN EFRAIN SARANGO CALVACHE**

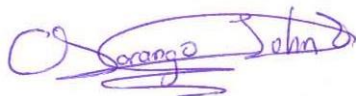
**TUTOR:
JOSÉ DOMINGO ALVIAR MALABET**

Quito, marzo del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Sarango Calvache John Efrain, con documento de identificación N°1721757886, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE ESTRUCTURAS APORTICADAS DE HORMIGÓN ARMADO UTILIZANDO LOS MÉTODOS MODAL ESPECTRAL (NEC 2015) Y TIEMPO HISTORIA DE ACELERACIONES (PEDERNALES 2016)”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Nombre: Sarango Calvache John Efrain

Cédula: 1721757886

Quito, marzo del 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, José Domingo Alviar Malabet declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo académico: COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE ESTRUCTURAS APORTICADAS DE HORMIGÓN ARMADO UTILIZANDO LOS MÉTODOS MODAL ESPECTRAL (NEC 2015) Y TIEMPO HISTORIA DE ACELERACIONES (PEDERNALES 2016)”, realizado por Sarango Calvache John Efrain, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2020

Atentamente



Ing. José Domingo Alviar Malabet (PhD)

C.I. 1757837602

COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE ESTRUCTURAS APORTICADAS DE HORMIGÓN ARMADO UTILIZANDO LOS MÉTODOS MODAL ESPECTRAL (NEC 2015) Y TIEMPO HISTORIA DE ACELERACIONES (PEDERNALES 2016).

COMPARISON OF THE DYNAMIC RESPONSE OF FRAME STRUCTURES OF REINFORCED CONCRETE USING THE SPECTRAL MODAL METHODS (NEC 2015) AND TIME HISTORY ACCELERATION (PEDERNALES 2016).

John Sarango Calvache¹.

Resumen

En esta investigación se realizará una comparación de las respuestas dinámicas de diferentes estructuras regulares aporticadas de hormigón armado (2, 5 y 10 pisos), a través de modelos lineales de Diseño Basado en Fuerzas (DBF), Método Modal espectral establecido por la Norma NEC-2015, los derivados de la historia de aceleraciones Pedernales 2016 y análisis no lineal tiempo-historia de aceleraciones. Mediante el programa SAP2000 se procedió a realizar las modelaciones de las diferentes estructuras propuestas partiendo de los pre-diseños realizados y a través de los resultados obtenidos para cada método de análisis realizado se pudo cuantificar en qué medida se vieron incrementadas las derivas, solicitaciones en los diferentes elementos estructurales, solicitaciones en la cimentación y cortantes de piso.

El análisis realizado en las diferentes Edificaciones, permite concluir que las solicitaciones derivadas de los análisis no lineales tiempo-historia superan a las solicitaciones derivadas del análisis modal espectral indicados en la NEC-15 y el obtenido del acelerograma medido en Pedernales (SEISMOSIGNAL) al utilizar un factor de reducción de respuesta de 8, por lo cual se sugiere revisar tanto en el factor de reducción R como en el valor de aceleración superficial z , a fin de aproximar los análisis modales espectrales a los análisis más rigurosos (no lineal tiempo-historia) y evitar que se sobrepase la deriva de

Abstract

In this investigation will be carried out a comparison of the dynamic responses of different regular structures frame of reinforced concrete (2, 5 and 10 floors), using linear models of Force-based Design (DBF), the spectral Modal method established by the Ecuadorian Standard of the Construction (NEC-2015), derivatives from the history of accelerations of Pedernales 2016 and nonlinear time-history analysis of accelerations. Through SAP2000 program, the modeling of the different structures proposed was carried out based on the pre-designs and through the results obtained for each method of analysis carried out, it was possible to quantify the extent to which drifts was exceeded, increase of the solicitations in the different structural elements, solicitations in the foundation and floor shears.

The performed analysis in different edifications, allows to conclude that derived solicitations from nonlinear time-history analyzes exceed the calculate forces from the spectral modal analyzes indicated in the NEC-15 and to the one obtained from the Acelerogram measured in Pedernales (SEISMOSIGNAL) when using a factor of response reduction of 8, so it is suggested to make changes in both, in response reduction factor R and in the surface acceleration value z , in order to approximate the spectral modal analyzes to the more rigorous analysis (nonlinear time-history) and avoiding to exceed the 2,5 % drift established as a

¹ Estudiante Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito, Sede Quito – Ecuador,
Autor para correspondencia ✉: jsarangoc1@est.ups.edu.ec

2.5 % establecida como condición de colapso de acuerdo con Vision 2000.

condition of collapse of buildings according to Vision 2000.

Palabras Clave: Deriva Inelástica de Colapso, Diseño Basado en Fuerzas (DBF), Factor de Reducción de Respuesta, Respuesta Dinámica.

Key Words: Inelastic Drift of Collapse, Force-Based Design (DBF), Response Reduction Factor Dynamic Response, Structural Solicitations.

1. Introducción

El comportamiento de las estructuras durante un sismo ha sido uno de los temas más estudiados, principalmente para garantizar que la estructura no colapse aun cuando se origine el sismo más severo y de esta manera salvaguardar las vidas de los seres humanos.

En el informe sísmico especial N°12-2016, publicado en la página del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), se determinó que la ciudad de Pedernales registró una intensidad máxima de 9/12 EMS (Escala Macrosísmica Europea) cuyo valor se vio reflejado en los daños ocasionados en las estructuras de la ciudad [1].

El tema de investigación consiste en analizar 3 tipos de estructuras regulares aporticadas de concreto armado (2, 5 y 10 pisos), en la ciudad de Pedernales, a través de análisis dinámicos lineal modal espectral obtenido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015), los derivados de la historia de aceleraciones de Pedernales y análisis no lineal tiempo-historia de aceleraciones. Los análisis modales espectrales se los realizó a través de los siguientes espectros de diseño:

- Espectro inelástico para la ciudad de Pedernales en base a la Norma NEC-2015 [2].

- Espectro inelástico de aceleraciones en base a los coeficientes de amplificación de suelo, relación de amplificación espectral y la aceleración máxima producida del sismo de Pedernales en la superficie del suelo.

- Espectro de respuesta inelástico del sismo de Pedernales con ayuda de programa Seismosignal [3] utilizado el acelerograma registrado por la estación APED la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Pedernales y forma parte de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC).

El análisis no lineal tiempo historia se lo realizó mediante los acelerogramas registrados por la estación APED.

La ubicación de las estructuras a analizarse se considera cercanas a la estación acelerográfica. En la ubicación de las estructuras se determinará el tipo de suelo de cimentación siendo esto un parámetro muy

importante para poder construir los respectivos espectros de diseño.

Finalmente, en base a la Norma NEC-2015 se realizará un análisis de los datos obtenidos de cada estructura a través de gráficos donde se relacionó los siguientes parámetros.

- Derivas de piso.
- Cortantes de piso.
- Solicitaciones en la base.
- Solicitaciones en los elementos estructurales (Columnas-Vigas).

Esto es de gran utilidad ya que por medio de esto podemos cuantificar el incremento de cada parámetro estudiado y de esta manera tomar acciones en los diseños definitivos de las estructuras o incluso sugerir cambios en el espectro de diseño de la norma NEC-2015.

2. Materiales y Métodos

La ubicación de las estructuras se considera que se encuentran en un sitio donde se realizó una perforación geotécnica identificada como BH08B, la cual se encuentra cercana a la estación acelerográfica APED cuyas coordenadas se indican en la Tabla 1 y Figura 1, [1] [4].

Tabla 1: Coordenadas de las estructuras y estación

Coordenadas UTM WGS84		
Parametro	X	Y
BH08B	443485,636	1110626,999
APED	443504,889	1110627,971



Figura 1. Ubicación de las estructuras y estación

2.1. Materiales

2.1.1. Planos Arquitectónicos

El plano arquitectónico de las edificaciones que se utilizara está conformado por plantas tipo las cuales tienen un área de 300.79 m² de igual manera las edificaciones están conformadas por losas alivianadas con vigas peraltadas.

2.1.2. Programa Sap2000

Sap2000 es un programa que se utiliza para realizar análisis estructural de estructuras basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF) el cual es ampliamente utilizado en el campo de la ingeniería civil [5].

2.1.3. Programa Seismosignal

SEISMOSIGNAL es un programa basado en el Método de los Elementos Finitos el cual es utilizado para realizar el procesamiento de la señal y corrección por línea base de los datos obtenidos de los acelerogramas [3], así como la generación de espectros de respuestas elásticos e inelásticos.

2.2. Metodología

2.2.1. Tipo de suelo

Para obtener el tipo de suelo donde estarán ubicadas las estructuras a analizar se utilizó un estudio de zonificación de la ciudad de Pedernales realizado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C [4], esta zonificación se la realizó en base a un ensayo de sísmica de refracción a diferentes profundidades como se indica en la tabla 2, en algunos puntos de la ciudad, unos de estos puntos se encuentran cercanos a la estación APED.

Con los datos de profundidad y la velocidad de ondas de corte (Vs) medidos en los diferentes estratos de espesor (d) que conforman el perfil litológico se procedió a determinar el tiempo de viaje de las ondas de corte (t) para cada estrato con la ecuación 1.

$$t = \frac{d}{V_s} \quad (1)$$

Una vez obtenido el tiempo de viaje de las ondas de corte para cada estrato de suelo estudiado se procedió a determinar el valor de

velocidad media de ondas de corte (Vs. media) con la ecuación 2 [2].

$$Vs. media = \frac{dtotal}{\sum t} \quad (2)$$

En la Tabla 2 se muestra los cálculos realizados para obtener la velocidad media de ondas de corte (Vs. media).

Tabla 2: Determinación de la velocidad media de ondas de corte (Vs. media)

Línea/Medición		Punto
Parametro		BH08B
Profundidad (m)	Vs (m/s)	t (s)
4	147	0.027
10	142	0.042
13	161	0.019
19	155	0.039
26	243	0.029
33	340	0.021
41	377	0.021
50	424	0.021
59	465	0.019
69	566	0.015
91	679	0.032
		0.287
Vs. media	316.77	m/s

Con la velocidad media de ondas de corte de 316.77 m/s se determinó que el perfil del suelo se tipifica como D, ya que la velocidad de ondas de corte está entre el rango de 180 m/s a 360 m/s de acuerdo a lo especificado en la norma NEC-2015 capítulo de Cargas Sísmicas tabla 2 clasificación de los perfiles de suelo [2].

2.2.2. Espectro de diseño de acuerdo a la norma NEC-2015

Determinado el tipo de suelo se procedió a determinar los Coeficiente de amplificación de suelo (Fa, Fs, Fd), el factor de zona sísmica (z), relación de amplificación espectral (η) y factor de reducción de resistencia sísmica (R), cuyos parámetros se indican en la Tabla 3 y son importantes para realizar el espectro elástico e inelástico de acuerdo a la Norma NEC-2015 como se indica en la Figura 2 [2].

Tabla 3: Parámetros para la realización del espectro elástico

Parametro	Valor
z	0.5
η	1.8
F_a	1.12
F_d	1.11
F_s	1.4
R	8

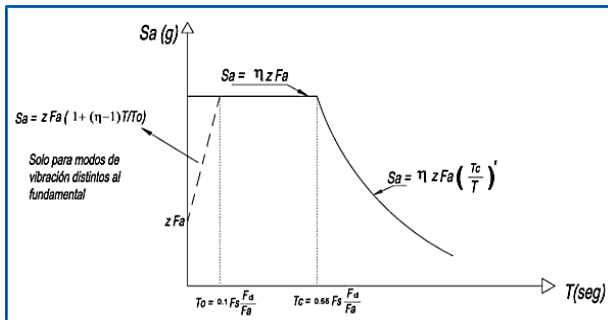


Figura 2. Espectro sísmico elástico de aceleraciones

Determinado los parámetros indicados anteriormente se procedió a realizar el espectro elástico e inelástico correspondiente.

2.2.3 Espectro escalado a partir de la aceleración máxima producida del sismo de Pedernales ($z=1.407$ g)

Considerando la aceleración máxima registrada superficialmente de 1.407 g [1] la cual supera ampliamente el valor dado por la norma NEC ($z=0.5$ g), se elaboró un espectro escalado o amplificado utilizando los mismos parámetros de relación aceleración en meseta contra aceleración en superficie indicado en la norma ecuatoriana NEC-2015. Este espectro de análisis se lo realiza con el fin de comparar los resultados obtenidos con los demás análisis y ver hasta qué punto escalar el espectro de diseño es o no suficiente.

2.2.4 Espectro de Respuesta del sismo de Pedernales con ayuda del programa Seismosignal

A partir de los datos registrados en los acelerogramas y con ayuda del programa Seismosignal se procedió a realizar el espectro de respuesta elástico e inelástico correspondiente.

En la Figura 3 se indican los espectros inelásticos y elásticos de aceleraciones descritos anteriormente, los espectros inelásticos fueron reducidos por el Factor de Reducción de Resistencia Sísmica de 8. Particularmente para el periodo cero, las estructuras son infinitamente rígidas y se mueven con la misma aceleración del terreno.

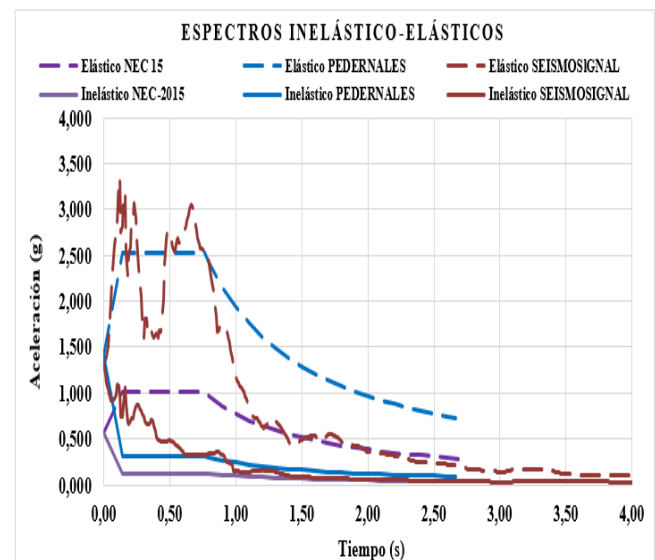


Figura 3. Espectros Elásticos e Inelásticos de aceleraciones

2.2.5. Acelerogramas

En la Figura 4 y 5 se muestran los acelerogramas en sentido X y Y registrados por la estación acelerográfica APED, en los cuales se registran valores de aceleraciones máximas de 13.80 m/s² sentido X y de 8.12 m/s² sentido Y [1] [6].

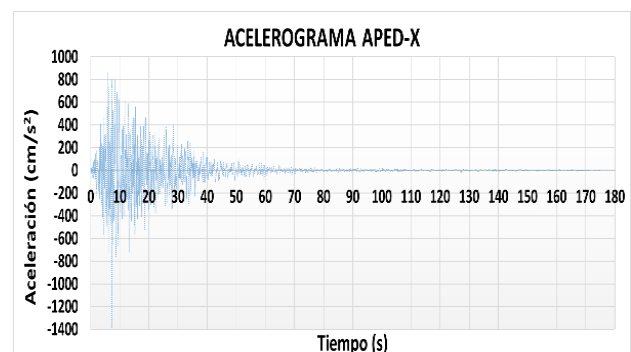


Figura 4. Acelerograma sentido X (APED-X)

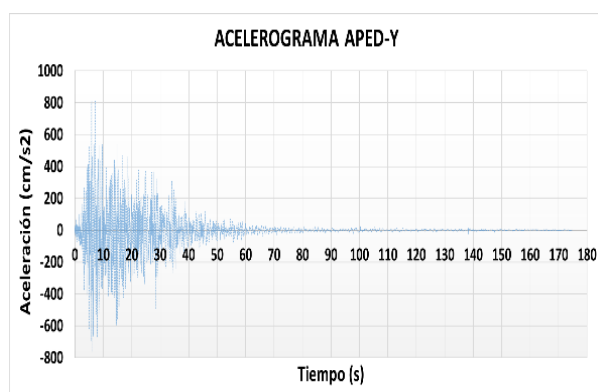


Figura 5. Acelerograma sentido Y (APED-Y)

2.2.6. Cortante Basal (V)

El cortante basal (V) para la ciudad de Pedernales se lo determinó con la Ecuación 3, de acuerdo a los parámetros establecidos en la norma NEC-2015 como se indica en la Tabla 4 [2].

$$V = \frac{I \cdot S_a}{R \cdot \phi_E \cdot \phi_P} \times W \quad (3)$$

Donde:

V= Cortante basal

I= Coeficiente de importancia

S_a= Aceleración espectral máxima;

R= Factor de reducción de resistencia sísmica

ϕ_E= Coeficientes de configuración de elevación

ϕ_P= Coeficientes de configuración en planta

W= Carga sísmica reactiva

Tabla 4: Parámetros para la determinación del cortante basal (V)

Parametro	Valor
I	1
S _a (10 pisos)	0,61
S _a (2 y 5 pisos)	1,01
R	8
ϕ _E	1
ϕ _P	1

Aplicando la ecuación 3 se obtuvo un porcentaje de cortante basal para la edificación de 2 y 5pisos de 12.6 % W y para la edificación de 10 pisos es de 7,68 % W. Este valor es necesario para realizar el análisis estático.

2.2.7. Análisis no lineal Tiempo-Historia.

El análisis Tiempo-Historia se lo realizó a través de un análisis no lineal con el método de

Newmark donde se utilizó la cantidad de acero requerido en los elementos estructurales por la norma NEC-2015, adicionalmente se colocó rótulas plásticas en los extremos de vigas y columnas [7] lo cual es necesario para el análisis no lineal tiempo historia.

Para modelar las rótulas plásticas se utilizó los modelos sugeridos por el programa Sap2000 en término de Momento-Rotación el cual está detallado en la norma ASCE 41-13 [8]cuya representación gráfica se muestra en la Figura 6.

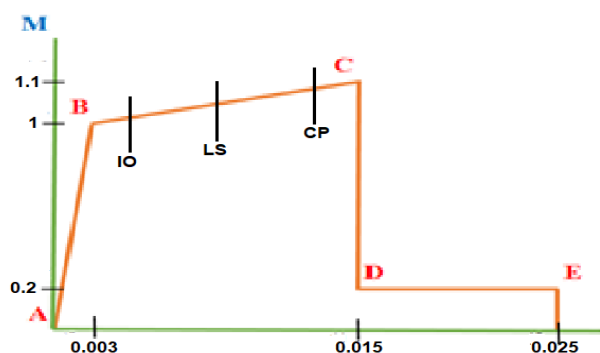


Figura 6. Modelo Momento-Rotación (rótula plástica)

Esta figura está conformada por 4 tramos identificados de la siguiente manera:

-AB: Zona de comportamiento elástico, se alcanza el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO).

-BC: Zona de comportamiento plástico, se produce un incremento del 10 % en la resistencia y una rigidez baja, este tramo parte del nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO), continúa por el nivel de desempeño seguridad de vida (LS) y termina en el nivel de desempeño de pre-colapso (CP).

-CD: Pérdida de resistencia, una vez superado el pre- colapso.

-DE: Resistencia residual o remanente.

-E: Fractura.

2.2.8. Pre-diseños de los elementos estructurales

La realización de los diferentes pre-diseños se basó en:

-Norma Ecuatoriana de la Construcción [2] [9] [10].

-American Concrete Institute [11].

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los elementos estructurales de cada estructura.

Tabla 5: Resumen de los diseños de los elementos estructurales

Resumen de los diseños de los elementos estructurales		
Estructura	Vigas (cm)	Columnas (cm)
2 Pisos	25x35	30x35
	25x40	40x40
	30x45	40x50
	30x50	
5 Pisos	25x35	30x35
	25x40	50x50
	30x50	50x60
	30x60	50x70
10 Pisos	25x35	30x35
	25x40	50x50
	30x60	60x70
	35x55	65x60
	35x60	

El espesor de la losa alivianada se considera igual para todas las estructuras y será de 25 cm y su losa equivalente maciza será de 18 cm, $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ y $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.

2.2.9. Transformada de Fourier del sismo de Pedernales

Se realizó la Transformada de Fourier con ayuda del programa SeismoSignal [3] para obtener el periodo y frecuencia predominante del sismo de Pedernales. Los valores máximos de respuesta se encuentran entre los periodos comprendidos entre 0.525 a 0.848 (segundos) y de frecuencia de 1.901 a 1.777 (Hz), como se muestra en la Figura 7.

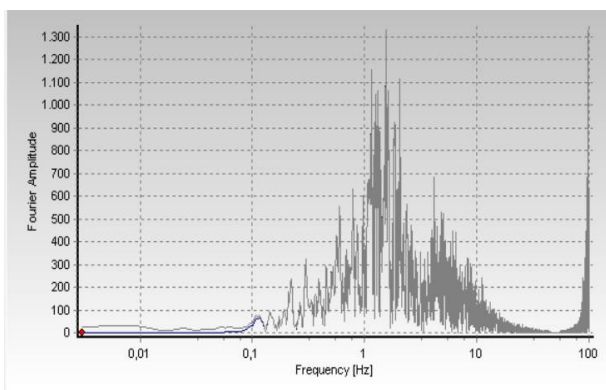


Figura 7. Transformada de Fourier sismo de Pedernales (2016)

2.2.10. Modelaciones

Se realizó las 3 modelaciones respectivas en el programa SAP2000 como se muestran en la Figura 8, aplicando los métodos modales espectral y tiempo historia, donde se utilizó los tres espectros inelásticos descritos anteriormente y los acelerogramas correspondientes.

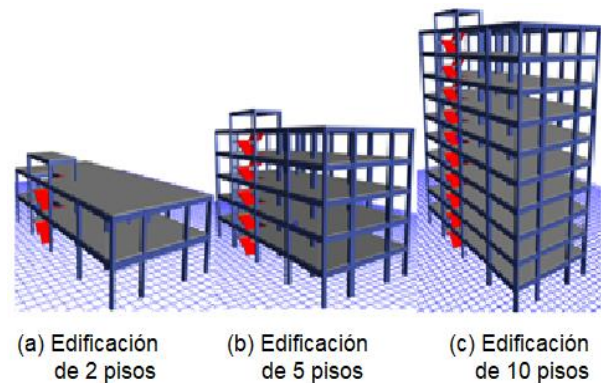


Figura 8. Modelaciones en Sap2000.

2.3. Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos se obtuvieron de los siguientes análisis:

- (A) Análisis modal espectral con el espectro inelástico NEC-2015 [2] (S_x NEC-15, S_y NEC-2015).
- (B) Análisis ESTÁTICO obtenido a partir de la norma NEC-2015 [2] a través del valor del cortante basal (S_x , S_y).
- (C) Análisis modal espectral con el espectro inelástico PEDERNALES (S_x PEDERNALES, S_y PEDERNALES).
- (D) Análisis modal espectral con el espectro de respuesta inelástico obtenido con el programa SEISMOSIGNAL (S_x SEISMOSIGNAL, S_y SEISMOSIGNAL).
- (E) Análisis NO LINEAL TIEMPO-HISTORIA utilizando los acelerogramas obtenidos por la estación APED (S_x ACELEROGRAMA, S_y ACELEROGRAMA).

También para esta investigación se utilizó el criterio de vision 2000 el cual considera un nivel de desempeño basándose en el valor de las derivas inelásticas como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6: Niveles de desempeño (Vision 2000) [12] [13]

Nivel de desempeño	Deriva Inelástica (%)
Ocupación Inmediata	≤ 0.2
Operacional	≤ 0.5
Seguridad de Vida	≤ 1.5
Pre Colapso	≤ 2.5
Colapso	> 2.5

A continuación, se describe el significado de cada nivel de desempeño.

-Ocupación Inmediata (IO): Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Las instalaciones continúan prestando sus servicios y funciones después del sismo [12] [13].

-Operacional (O): Daño entre leve y moderado. Las instalaciones esenciales continúan en servicio y las no esenciales pueden sufrir interrupciones de inmediata recuperación. Los sistemas de seguridad y evacuación funcionan con normalidad [12] [13].

-Seguridad de Vida (LS): Daños moderados en algunos elementos estructurales. El sistema permanece funcional. Algunos elementos no estructurales y contenidos pueden dañarse. Puede ser necesario cerrar el edificio temporalmente [12] [13].

-Pre Colapso (PC): Daños estructurales severos en la proximidad del colapso estructural. Fallo de elementos secundarios, no estructurales y contenidos. La seguridad de los ocupantes comprometida [12] [13].

-Colapso (C): Colapso estructural. No es posible la reparación [12] [13].

Las estructuras diseñadas atienden a los requisitos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción capítulo de Riesgo Sísmico (NEC-SE-DS, 2015), cumpliendo los siguientes controles: participación de masas modales mayor al 90% en los modos pertinentes (ver anexo A1), relación del cortante dinámico y cortante estático mayor al 80% para estructuras regulares (ver tabla 9) y derivas entre pisos menores al 2 % (ver figuras 9 y 10).

3. Resultados y Discusión

3.1. Derivas

Las derivas fueron obtenidas mediante la ecuación 4 descrita en la norma NEC-SE-DS, 2015) [2].

$$\Delta i = 0.75 \times \Delta e \times R \quad (4)$$

Donde:

Δi = Deriva inelástica

Δe = Deriva elástica

R= Factor de reducción de resistencia sísmica

En las Figuras 9 y 10 se presentan los valores máximos de las derivas inelásticas para cada sentido de las diferentes estructuras, de acuerdo a los análisis realizados en el programa SAP2000.

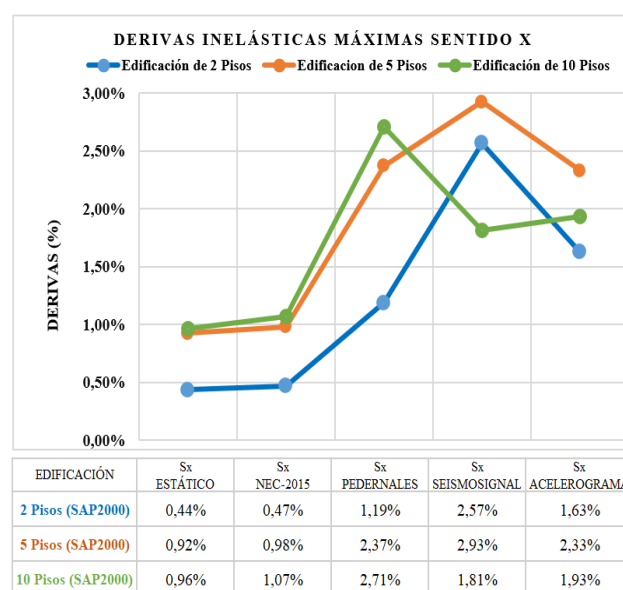


Figura 9. Derivas inelásticas sentido X

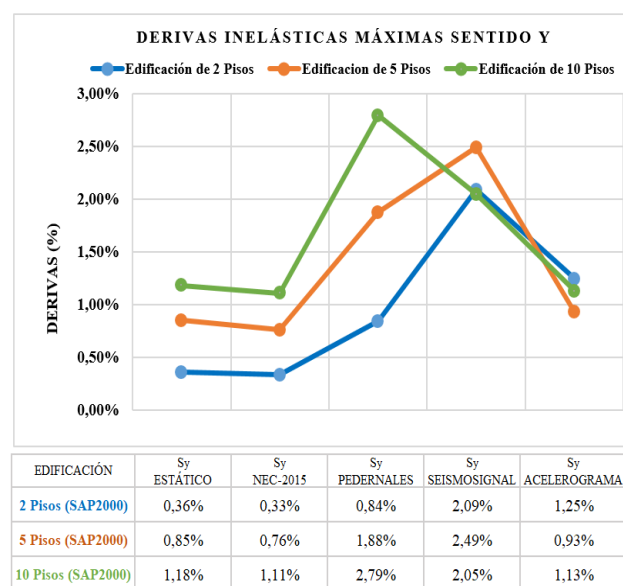


Figura 10. Derivas inelásticas sentido Y

De las figuras 9 y 10 se puede observar que para los análisis: ESTÁTICO y análisis modal espectral NEC-2015 las derivas no superan el límite del 2 % establecido por la norma NEC-2015, mientras que para el análisis modal espectral PEDERNALES en el eje más crítico de las edificaciones de 5 y 10 pisos supera el límite del 2% y el análisis modal espectral SEISMOSIGNAL en el eje más crítico de las edificaciones de 2 y 5 pisos superan dicho límite.

Mientras que del análisis tiempo historia la edificación de 5 pisos en el eje x supera el límite del 2%.

En la Tabla 7, se presentan la relación que existe entre el análisis modal espectral NEC-2015 y los demás análisis realizados.

Tabla 7: Relación de Derivas respecto a NEC-2015

Relación de Derivas respecto a NEC-2015						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	1,1
C	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5
D	5,4	6,2	3,0	3,3	1,7	1,9
E	3,5	3,7	2,4	1,2	1,8	1,0

Tomando como base los resultados obtenidos del análisis modal espectral de la NEC-2015 se destaca que de los análisis modales espectrales realizados y del diseño basado en fuerzas la condición más exigente se consigue con el espectro de respuesta inelástico SEISMOSIGNAL que se deriva del acelerograma de Pedernales, en la edificación de 2 pisos, con un valor que supera en 6,2 veces a la deriva NEC-2015.

De igual forma del análisis modal espectral NEC-2015 en relación al análisis no lineal tiempo historia se destaca que la condición más exigente se encuentra en la edificación de 2 pisos con un valor que supera en 3,7 veces a la deriva NEC-2015.

Estos incrementos descritos se pueden observar de mejor manera en las Figuras 11 y 12, donde se incluye los demás valores de los diferentes análisis en relación a NEC-2015.

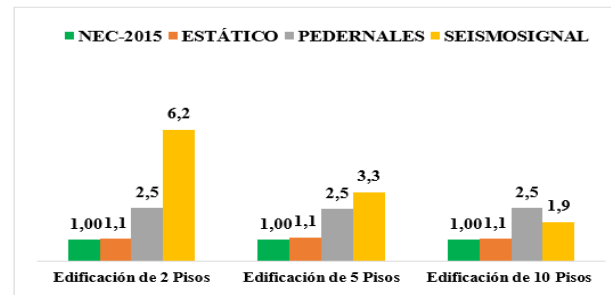


Figura 11. Incremento de las Derivas respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

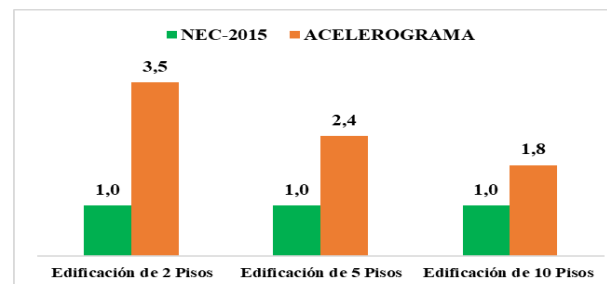


Figura 12. Incremento de las Derivas respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

En la Tabla 8 se muestra el nivel de desempeño de las diferentes edificaciones para cada análisis realizado.

Tabla 8: Nivel de Desempeño (vision 2000)

Nivel de Desempeño (Vision 2000)			
Casos	Edif. de 2 Pisos	Edif. de 5 Pisos	Edif. de 10 Pisos
A	0,47%	X	1,07%
		LS	LS
B	0,44%	LS	0,96%
		LS	LS
C	1,19%	2,37%	2,71%
		CP	C
D	2,57%	2,93%	1,81%
		C	CP
E	1,63%	2,33%	1,93%
		CP	CP
A	0,33%	Y	1,11%
		LS	LS
B	0,36%	LS	1,18%
		LS	LS
C	0,84%	1,88%	2,79%
		CP	C
D	2,09%	2,49%	2,05%
		CP	CP
E	1,25%	0,93%	1,13%
		LS	LS

De acuerdo a la Tabla 8 se puede observar que de los análisis espectrales del diseño basado en fuerzas y tiempo historia, la edificación de 5 pisos en el eje X tiene la mayor deriva de 2,9 %, adquiriendo un nivel de desempeño de Colapso, el cual se consigue con el espectro de respuesta inelástico SEISMOSIGNAL.

3.2 Cortante Basal

En las Figuras 13 y 14 se presentan los valores de cortante basal, para cada sentido de las diferentes edificaciones.

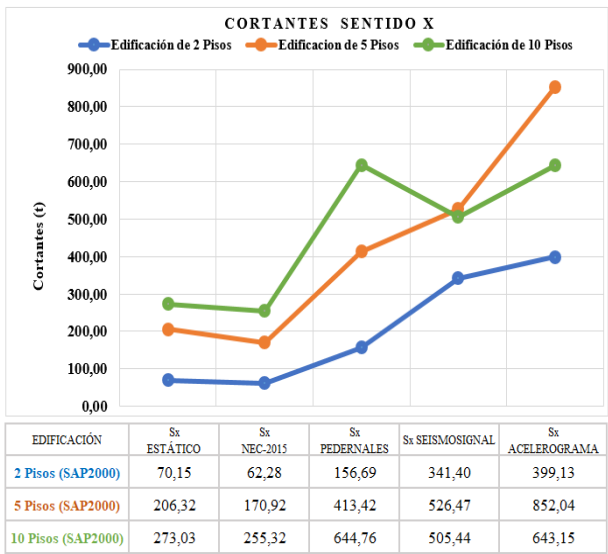


Figura 13. Cortante basal sentido X (toneladas)

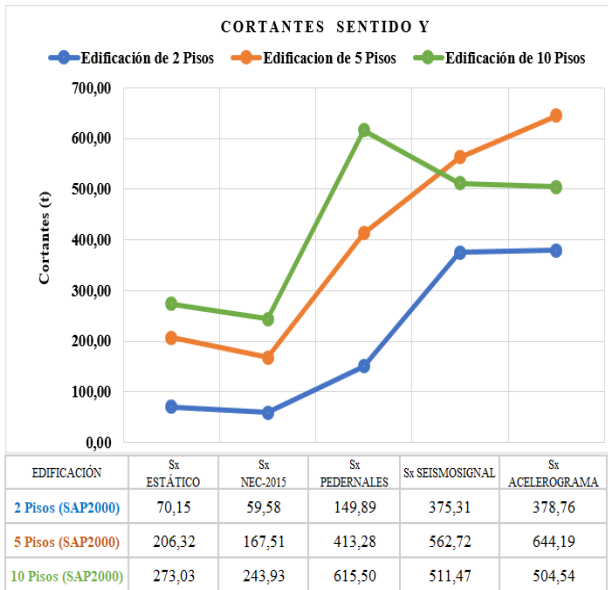


Figura 14. Cortante basal sentido Y (toneladas)

Se relacionaron los cortantes del análisis modal espectral A y el análisis B en los sentidos X y Y, se tiene una proporción para la edificación de 2 pisos del 89 % y 85 %, mientras que para la edificación de 5 pisos hay una proporción del 83 % y 81 % y para la edificación de 10 pisos hay una proporción del 94 % y 89 % respectivamente como se puede observar en la tabla 9, cumpliendo lo establecido para estructuras regulares de acuerdo a la Norma NEC-2015 [2].

Tabla 9: Ajuste del cortante basal

Ajuste del cortante basal						
Cortante	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
Dinámico	62,3	59,6	170,9	167,5	255,3	243,9
Estático	70,2	70,2	206,3	206,3	273,0	273,0
Relación	89%	85%	83%	81%	94%	89%

En la Tabla 10, se presentan la relación que existe entre el análisis modal espectral NEC-2015 y los demás análisis realizados.

Tabla 10: Relación de Cortante basal respecto a NEC-2015

Relación de Cortante basal respecto a NEC-2015						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	1,1	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
C	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5
D	5,5	6,3	3,1	3,4	2,0	2,1
E	6,4	6,4	5,0	3,8	2,5	2,0

De igual manera la condición más exigente se da en la edificación de 2 pisos con el espectro de respuesta inelástico SEISMOSIGNAL y el análisis no lineal tiempo-historia que superan en 6,3 y 6,4 veces más el cortante de la Norma NEC-2015 respectivamente.

Estos incrementos descritos se pueden observar de mejor manera en las Figuras 15 y 16, donde se incluye los demás valores de los diferentes análisis en relación a NEC-2015.

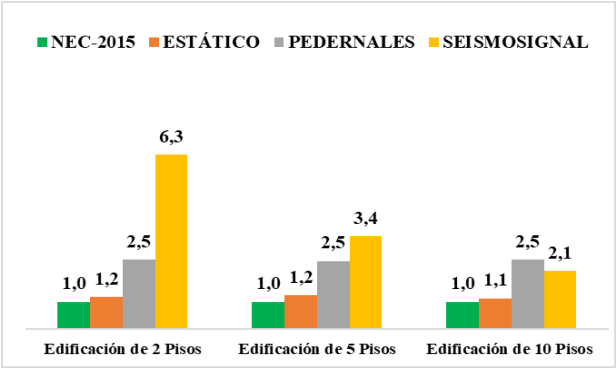


Figura 15. Incremento de las Cortante Basal respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

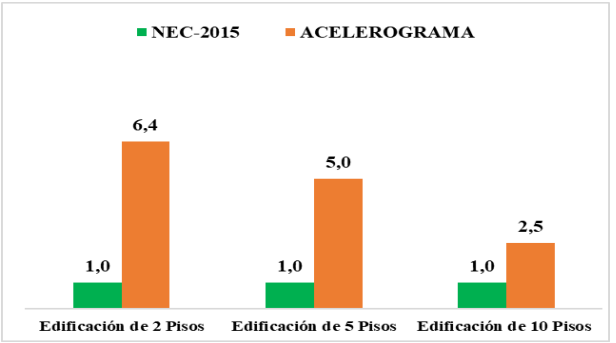


Figura 16. Incremento de las Cortante Basal respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

3.3 Reacciones

En las Figuras 17 a 22, se presentan los valores de las Reacciones en la cimentación del eje (4-B), el cual fue el más afectado por el análisis modal espectral NEC-2015.

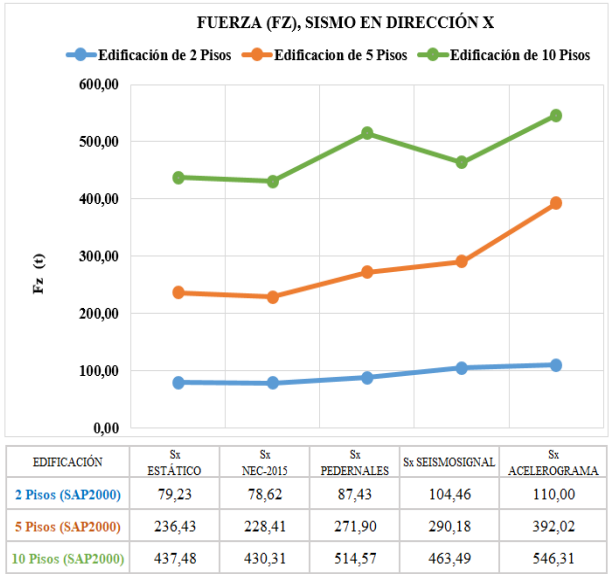


Figura 17. Reacción (Fz) sentido X (toneladas)

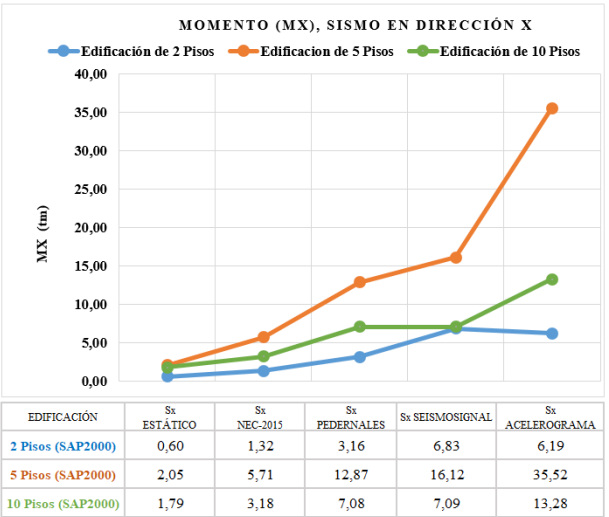


Figura 18. Reacción (Mx) sentido X (toneladas. metro)

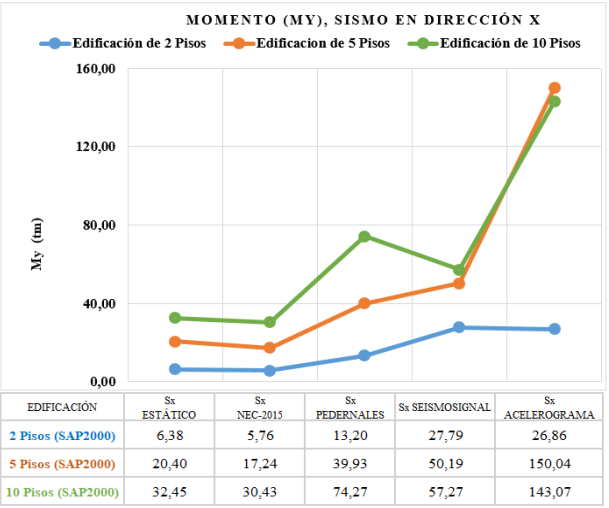


Figura 19. Reacción (My) sentido X (toneladas. metro)

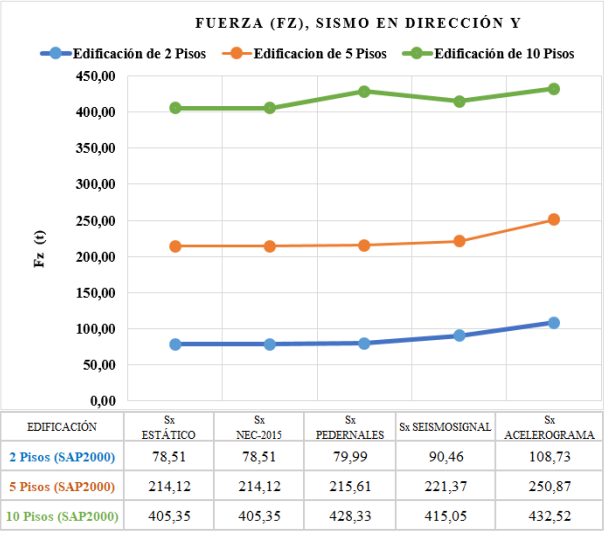


Figura 20. Reacción (Fz) sentido Y (toneladas)

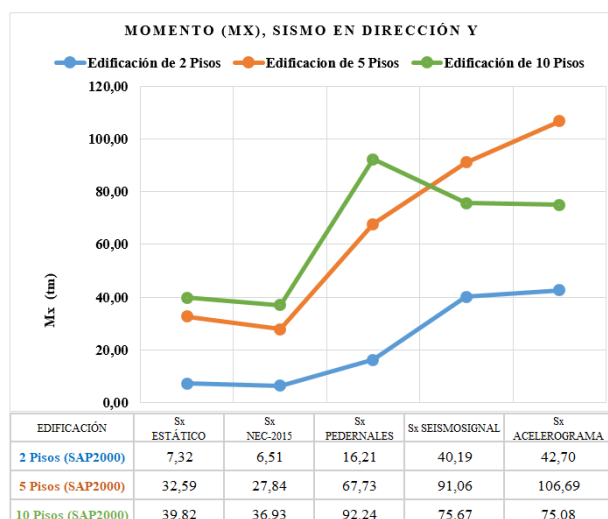


Figura 21. Reacción (Mx) sentido Y (toneladas. metro)

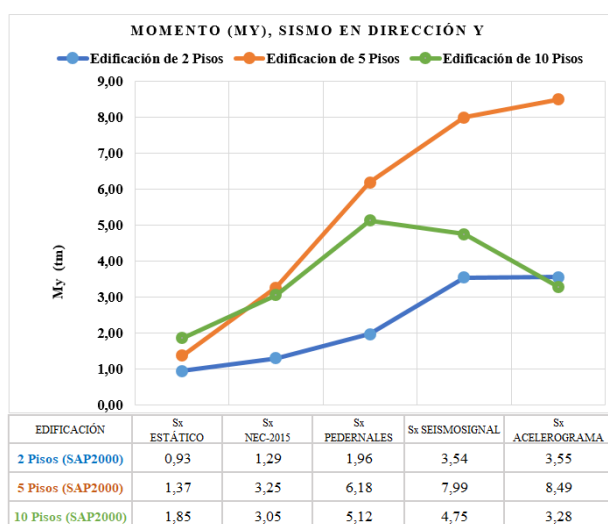


Figura 22. Reacción (My) sentido Y (toneladas. metro)

En la Tablas 11, 12 y 13, se presentan la relación que existe entre el análisis modal espectral NEC-2015 y los demás análisis realizados.

Tabla 11: Relación de la Fuerza axial (Fz) respecto a NEC-2015

Relación de la Fuerza axial (Fz) respecto a NEC-2015						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,1	1,0	1,2	1,0	1,2	1,1
D	1,3	1,2	1,3	1,0	1,1	1,0
E	1,4	1,4	1,7	1,2	1,3	1,1

Tabla 12: Relación de Momento (Mx) respecto a NEC-2015

Relación de Momento (Mx) respecto a NEC-2015						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	0,5	1,1	0,4	1,2	0,6	1,1
C	2,4	2,5	2,3	2,4	2,2	2,5
D	5,2	6,2	2,8	3,3	2,2	2,0
E	4,7	6,6	6,2	3,8	4,2	2,0

Tabla 13: Relación de Momento (My) respecto a NEC-2015

Relación de Momento (My) respecto a NEC-2015						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	1,1	0,7	1,2	0,4	1,1	0,6
C	2,3	1,5	2,3	1,9	2,4	1,7
D	4,8	2,7	2,9	2,5	1,9	1,6
E	4,7	2,7	8,7	2,6	4,7	1,1

Con los resultados obtenidos del análisis modal espectral de la NEC-2015 se destaca que de los análisis modales espectrales realizados y del diseño basado en fuerzas la condición más exigente se consigue con el espectro inelástico SEISMOSIGNAL en la edificación de 2 pisos, donde la fuerza axial (Fz) supera en 1,3 veces a la NEC-15 y los momentos (Mx, My) en 6,2 y 4,8 veces más respectivamente en su eje más crítico.

De igual forma del análisis modal espectral NEC-2015 en relación al análisis no lineal tiempo historia se destaca que la condición más exigente se encuentra en la edificación de 5 pisos donde la fuerza axial (Fz) supera en 1,7 veces a la NEC-15 y los momentos (Mx, My) supera en 6,2 y 8,7 veces más respectivamente para su eje más crítico

Estos incrementos descritos se pueden observar de mejor manera en las Figuras 23 a 28 donde se incluye los demás valores de los diferentes análisis en relación a NEC-2015.

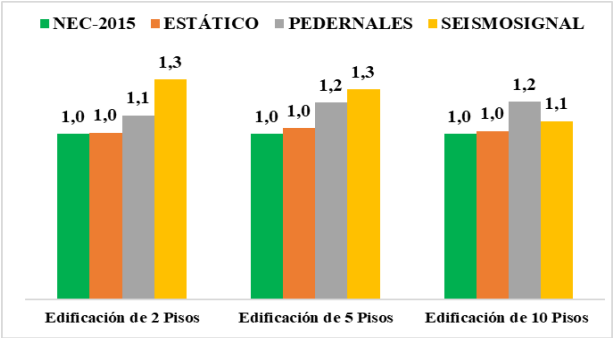


Figura 23. Incremento de las Fuerzas axiales (Fz) respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

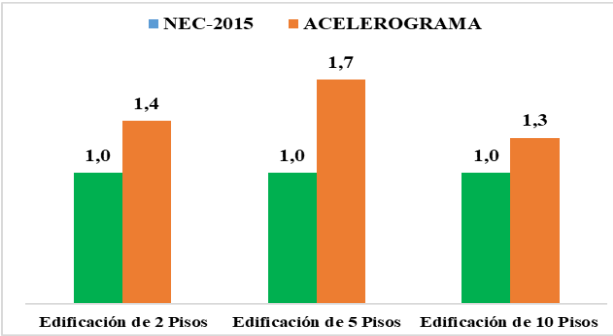


Figura 24. Incremento de las Fuerzas axiales (Fz) respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

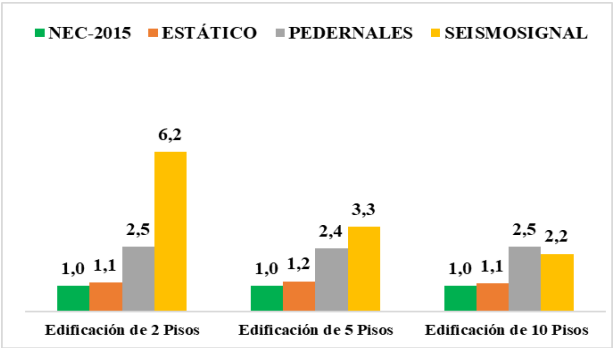


Figura 25. Incremento de los Momentos (Mx) respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

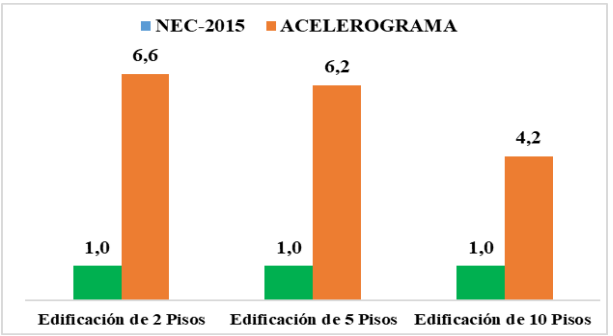


Figura 26. Incremento de los Momentos (Mx) respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

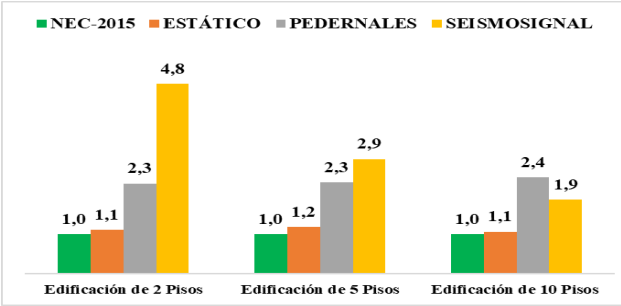


Figura 27. Incremento de los Momentos (My) respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

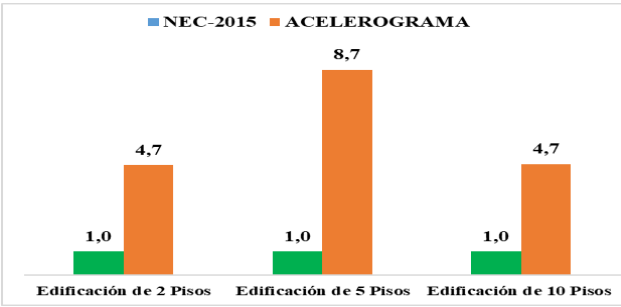


Figura 28. Incremento de los Momentos (My) respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

3.4 Diseño de Columnas y Vigas

3.4.1 Diseño de columnas

Para las diferentes edificaciones se determinó que la columna ubicada en el eje (4-B) fue la más afectada por el análisis modal espectral NEC-2015 y en base a esto se establecerá la relación existente con los demás análisis.

En las Figuras 29 a 34 se muestran las diferentes solicitaciones que actúan en la columna del eje 4-B en todas las edificaciones.

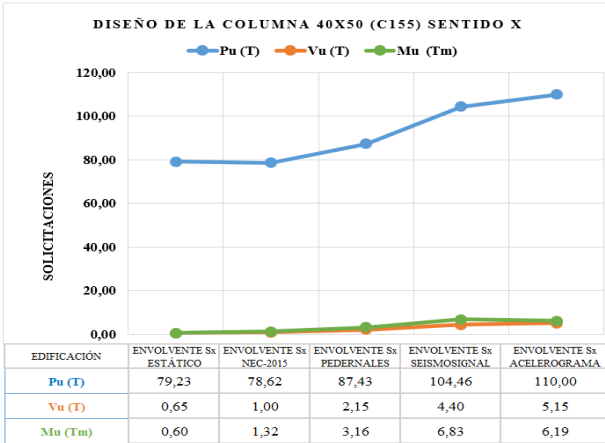


Figura 29. Solicitaciones de diseño de la columna (C155) Sentido X (Edificación de 2 Pisos)

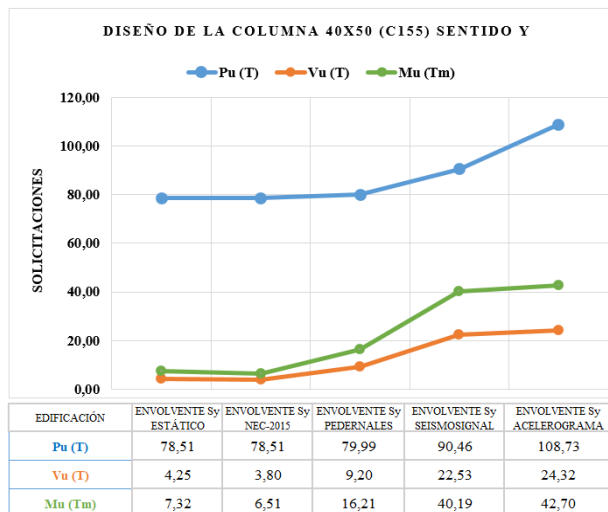


Figura 30. Solicitaciones de diseño de la columna (C155) Sentido Y (Edificación de 2 Pisos)

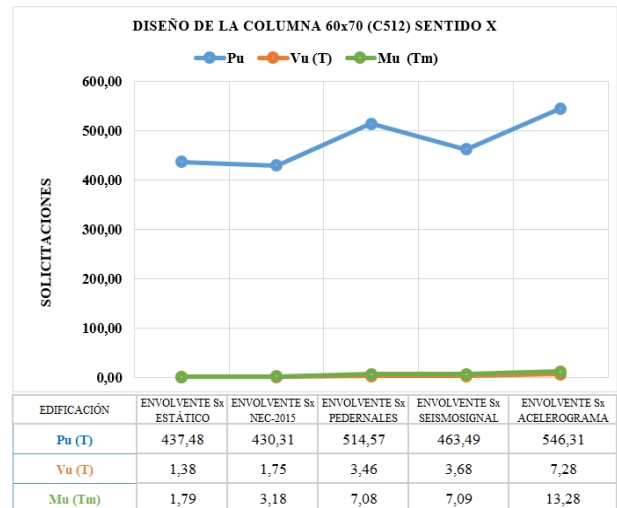


Figura 33. Solicitaciones de diseño de la columna (C512) Sentido X (Edificación de 10 Pisos)

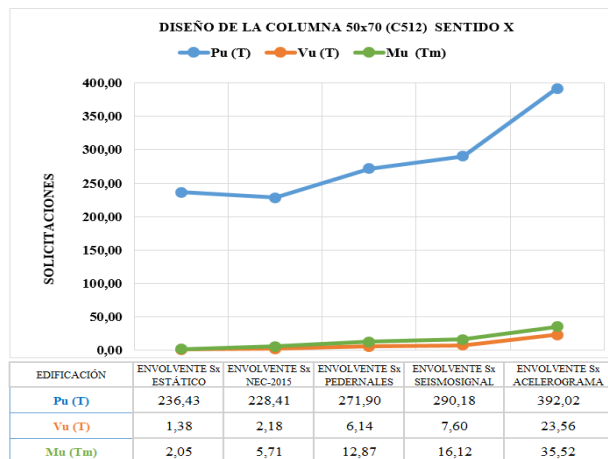


Figura 31. Solicitaciones de diseño de la columna (C512) Sentido X (Edificación de 5 Pisos)

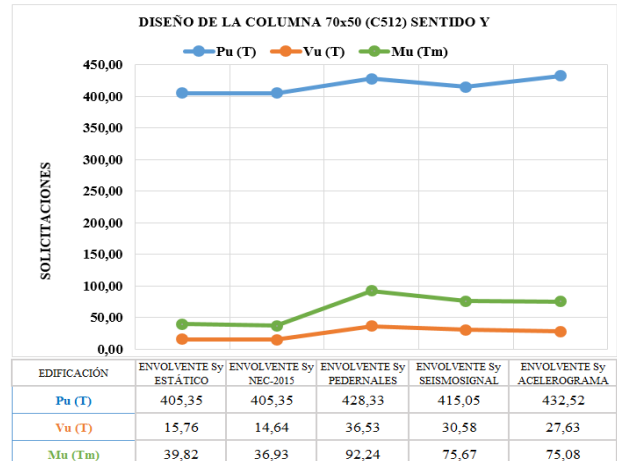


Figura 34. Solicitaciones de diseño de la columna (C512) Sentido Y (Edificación de 10 Pisos)

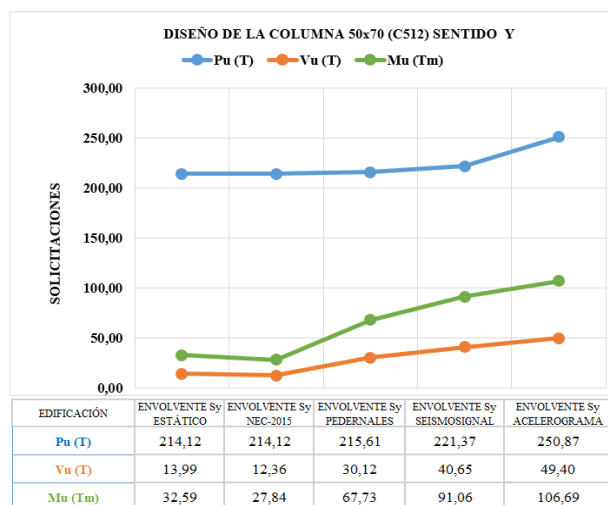


Figura 32. Solicitaciones de diseño de la columna (C512) Sentido Y (Edificación de 5 Pisos)

En las Tablas 14, 15 y 16, se presenta la correlación que existe entre el análisis modal espectral NEC-2015 y los demás análisis realizados para la columna más solicitada.

Tabla 14: Relación de la Carga última (Pu) respecto a NEC-2015 en la columna más solicitada

Relación de la Carga última (Pu) respecto a NEC-2015 en la columna más solicitada						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,1	1,0	1,2	1,0	1,2	1,1
D	1,3	1,2	1,3	1,0	1,1	1,0
E	1,4	1,4	1,7	1,2	1,3	1,1

Tabla 15: Relación del Cortante último (Vu) respecto a NEC-2015 en la columna más solicitada

Relación del Cortante último (Vu) respecto a NEC-2015 en la columna más solicitada						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	0,7	1,1	0,6	1,1	0,8	1,1
C	2,1	2,4	2,8	2,4	2,0	2,5
D	4,4	5,9	3,5	3,3	2,1	2,1
E	5,1	6,4	10,8	4,0	4,2	1,9

Tabla 16: Relación del Momento último (Mu) respecto a NEC-2015 en la columna más solicitada

Relación del Momento último (Mu) respecto a NEC-2015 en la columna más solicitada						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	0,5	1,1	0,4	1,2	0,6	1,1
C	2,4	2,5	2,3	2,4	2,2	2,5
D	5,2	6,2	2,8	3,3	2,2	2,0
E	4,7	6,6	6,2	3,8	4,2	2,0

Con los resultados obtenidos del análisis modal espectral de la NEC-2015 se destaca que de los análisis modales espectrales realizados y del diseño basado en fuerzas la condición más exigente se consigue con el espectro inelástico SEISMOSIGNAL en la edificación de 2 pisos, donde la carga última (Pu), cortante último (Vu) y momento último (Mu) superan en valor de 1,3, 5,9 y 6,2 veces más a la NEC-15 respectivamente en su eje más crítico.

En relación al análisis no lineal tiempo historia se destaca que la condición más exigente se encuentra en la edificación de 5 pisos donde la carga última (Pu), cortante último (Vu) y momento último (Mu) superan en valor de 1,7, 10,8 y 6,2 veces más a la NEC-15 respectivamente para su eje más crítico

Estos incrementos descritos se pueden observar de mejor manera en las Figura 35 a 40, donde se incluye los demás valores de los diferentes análisis en relación a NEC-15.

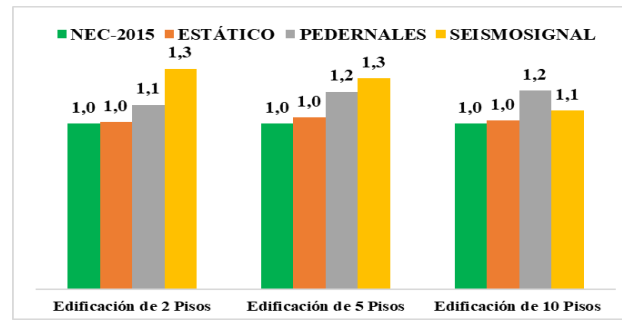


Figura 35. Incremento de la Carga última (Pu) respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

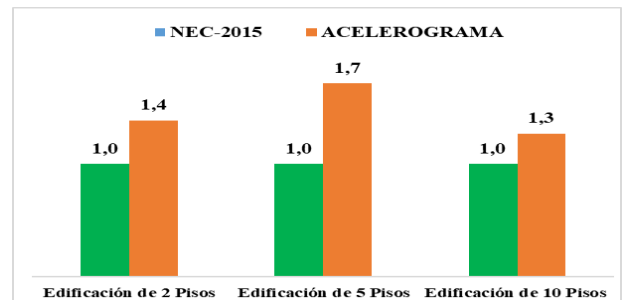


Figura 36. Incremento de la Carga última (Pu) respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

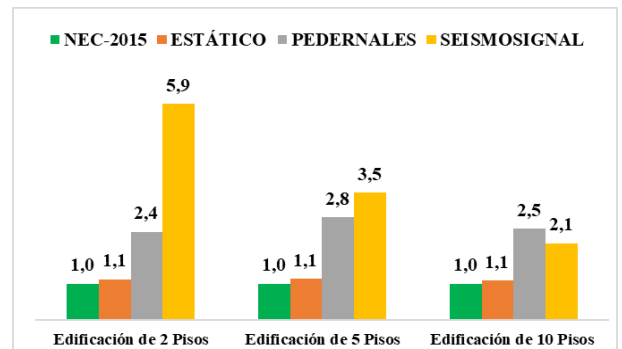


Figura 37. Incremento del Cortante último (Vu) respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

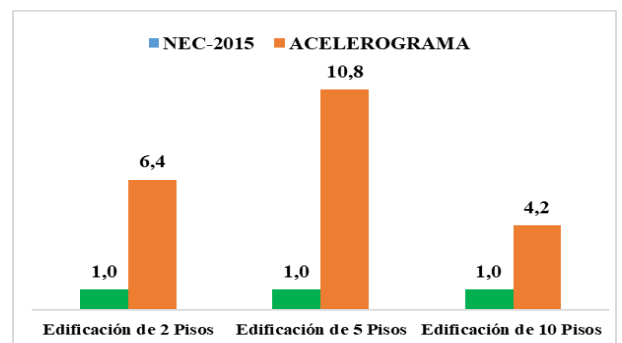


Figura 38. Incremento del Cortante último (Vu) respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

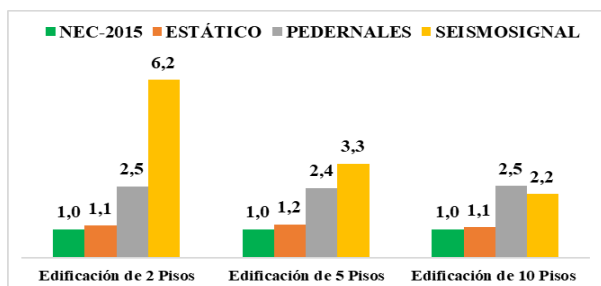


Figura 39. Incremento del Momento último (Mu) respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

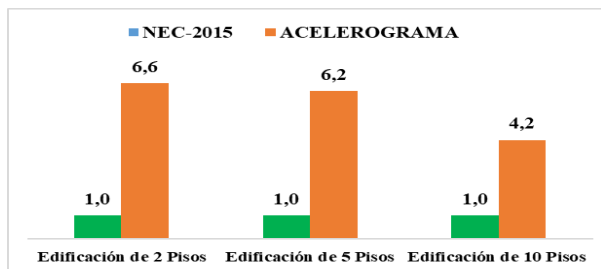


Figura 40. Incremento del Momento último (Mu) respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

3.4.1 Diseño de vigas

Para las diferentes edificaciones se determinó la viga más afectada por el análisis espectral NEC-2015, dependiendo del número de pisos de la edificación y en base a esto se determinará la proporción existente con los demás análisis.

En las Figuras 41 a 46 se muestran las diferentes solicitaciones que actúan en la viga más afectada para todos los casos estudiados.

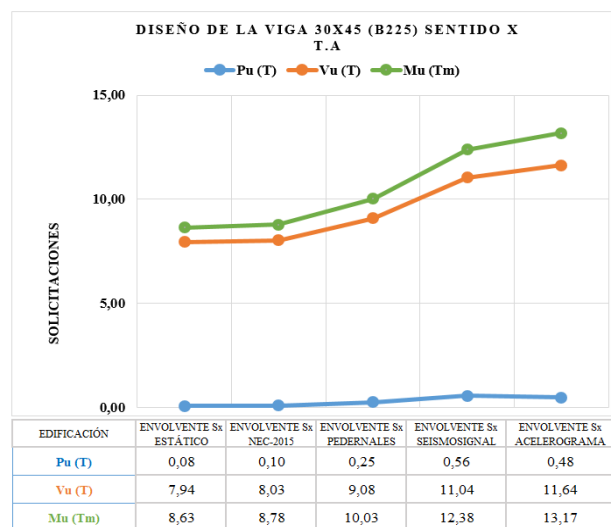


Figura 41. Solicitaciones de diseño de viga (B225) Sentido X (Edificación de 2 Pisos)

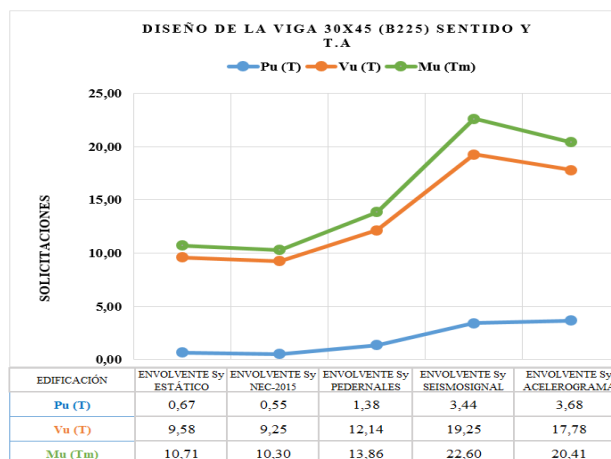


Figura 42. Solicitaciones de diseño de viga (B225) Sentido Y (Edificación de 2 Pisos)

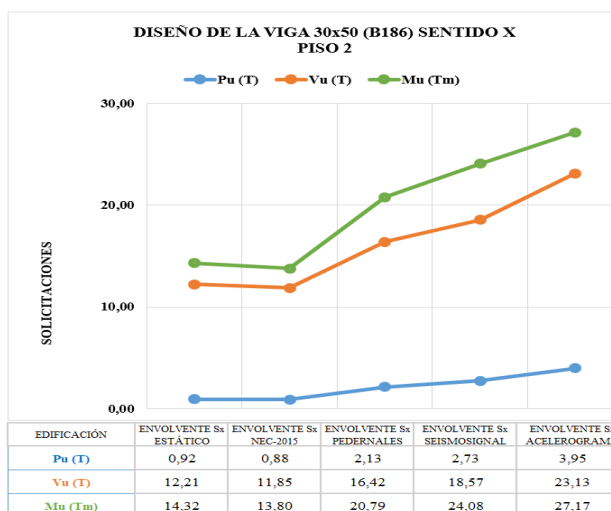


Figura 43. Solicitaciones de diseño de viga (B186) Sentido X (Edificación de 5 Pisos)

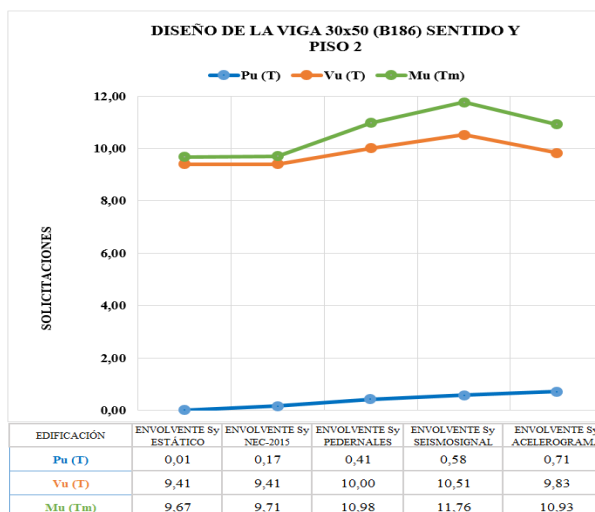


Figura 44. Solicitaciones de diseño de viga (B186) Sentido Y (Edificación de 5 Pisos)

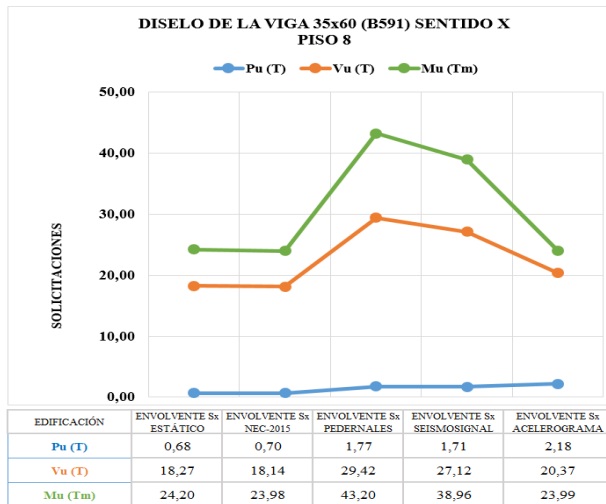


Figura 45. Solicitaciones de diseño de viga (B591) Sentido X (Edificación de 10 Pisos)

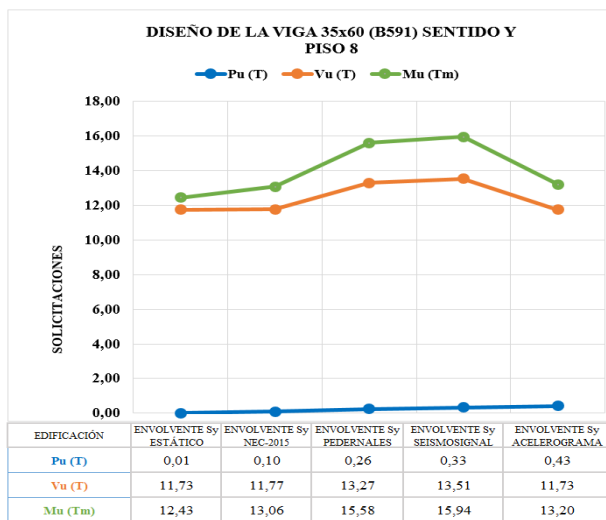


Figura 46. Solicitaciones de diseño de viga (B591) Sentido Y (Edificación de 10 Pisos)

En la Tablas 17, 18 y 19, se presentan la relación que existe entre el análisis espectral NEC-2015 y los demás análisis realizados.

Tabla 17 Relación de la Carga última (Pu) respecto a NEC-2015 en la viga más solicitada

Relación de la Carga última (Pu) respecto a NEC-2015 en la viga más solicitada						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	0,8	1,2	1,0	0,0	1,0	0,1
C	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5
D	5,5	6,3	3,1	3,5	2,4	3,2
E	4,8	6,7	4,5	4,3	3,1	4,2

Tabla 18: Relación del Cortante último (Vu) respecto a NEC-2015 en la viga más solicitada

Relación del Cortante último (Vu) respecto a NEC-2015 en la viga más solicitada						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,1	1,3	1,4	1,1	1,6	1,1
D	1,4	2,1	1,6	1,1	1,5	1,1
E	1,4	1,9	2,0	1,0	1,1	1,0

Tabla 19: Relación del Momento último (Mu) respecto a NEC-2015 en la viga más solicitada

Relación del Momento último (Mu) respecto a NEC-2015 en la viga más solicitada						
Análisis	Edif. de 2 Pisos		Edif. de 5 Pisos		Edif. de 10 Pisos	
	x	y	x	y	x	y
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,1	1,3	1,5	1,1	1,8	1,2
D	1,4	2,2	1,7	1,2	1,6	1,2
E	1,5	2,0	2,0	1,1	1,0	1,0

De igual manera la condición más exigente se consigue con el espectro de respuesta inelástico SEISMOSIGNAL en la edificación de 2 pisos, donde la carga última (Pu), cortante último (Vu) y momento último (Mu) superan un valor de 6,3, 2,1 y 2,2 veces más a la NEC-15 respectivamente para su eje más crítico, y en relación al análisis no lineal tiempo historia la condición más exigente se encuentra en la edificación de 5 pisos donde superan en valor de 4,5, 2,0 y 2,0 veces más.

Estos incrementos descritos se pueden observar de mejor manera en las Figura 47 a 52, donde se incluye los demás valores de los diferentes análisis en relación a NEC-2015.

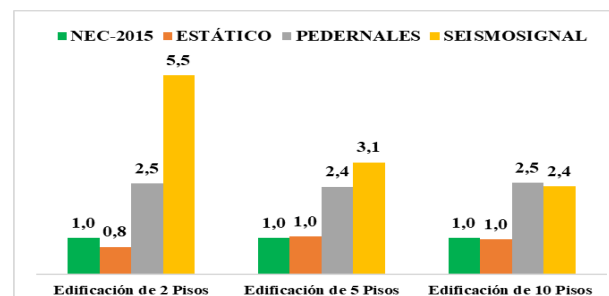


Figura 47. Incremento de la Carga última (Pu) respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

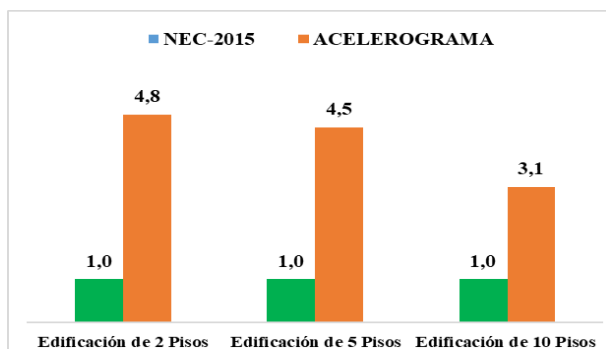


Figura 48. Incremento de la Carga última (Pu) respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

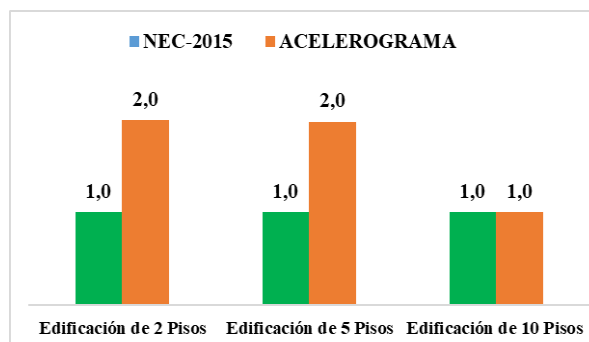


Figura 52. Incremento del Momento último (Mu) respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

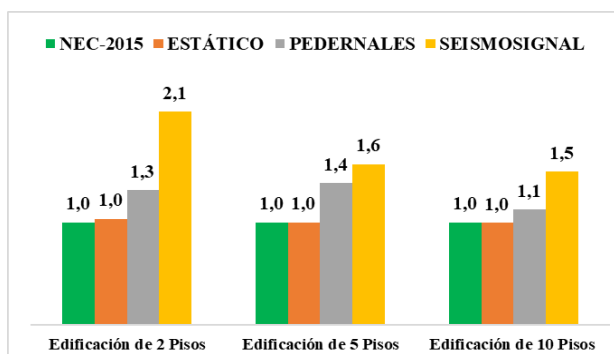


Figura 49. Incremento del Cortante último (Vu) respecto a NEC-2015

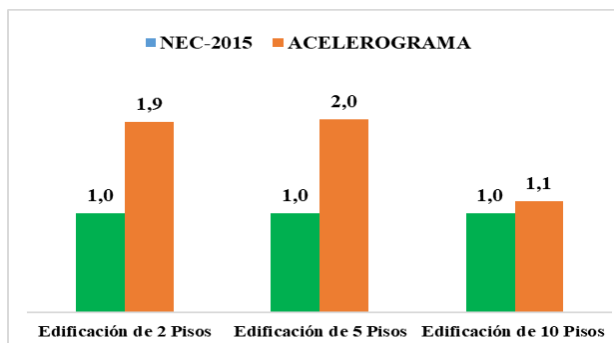


Figura 50. Incremento del Cortante último (Vu) respecto a NEC-2015 (No lineal Tiempo-Historia)

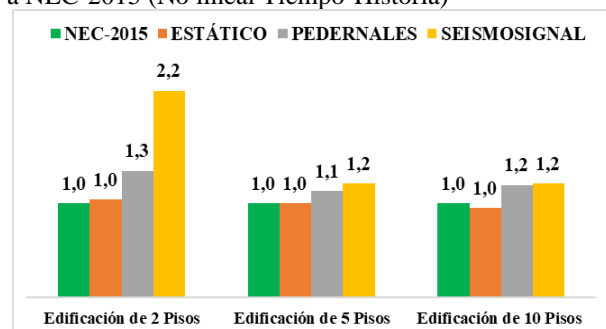


Figura 51. Incremento del Momento último (Mu) respecto a NEC-2015 (Estático – Espectrales)

Como resumen de los resultados obtenidos de los análisis realizados se establece que el espectro de respuesta inelástico SEISMOSIGNAL afectó más a las edificaciones de 2 y 5 pisos en relación al espectro inelástico PEDERNALES y NEC-2015, ya que estas edificaciones tienen periodos de 0,31 y 0,58 segundos respectivamente, los cuales se ubican en la zona más solicitada sísmicamente al utilizar el espectro de respuesta SEISMOSIGNAL con respecto al de PEDERNALES o la NEC (ver Fig. 3).

El espectro inelástico PEDERNALES afectó un poco más a la edificación de 10 pisos en relación a SEISMOSIGNAL en cuanto a las solicitaciones por carga axial y corte en las columnas ya que el periodo de la edificación es de 1,13 segundos y las aceleraciones espectrales obtenidas con el espectro inelástico de Pedernales son mayores a las obtenidas en el espectro de respuesta SEISMOSIGNAL, esto confirma y se corresponde con la Figura 3.

De igual manera en cuanto a la participación de masas modales mayores al 90 % tanto para el eje X y Y, se obtuvo que para la edificación de 2 pisos se alcanzó en los modos 3 y 4, mientras que para la estructura de 5 pisos se alcanzó en los modos 5 y 6 y en la estructura de 10 pisos en los modos 5 y 4 respectivamente, esto se puede evidenciar de mejor manera en las tablas 20, 21 y 22 que se muestran a continuación.

Tabla 20: Participación de masas modales para la estructura aporticada regular de 2 pisos.

Participación de masas modales par la estructura aporticada regular de 2 pisos			
Modos	Periodo (s)	Sum UX	Sum UY
1	0,31	86%	1%
2	0,28	88%	80%
3	0,26	90%	89%
4	0,22	90%	90%

Tabla 21: Participación de masas modales para la estructura aporticada regular de 5 pisos

Participación de masas modales par la estructura aporticada regular de 5 pisos			
Modos	Periodo (s)	Sum UX	Sum UY
1	0,58	71%	4%
2	0,55	78%	76%
3	0,49	82%	83%
4	0,21	82%	83%
5	0,19	92%	84%
6	0,18	93%	92%

Tabla 22: Participación de masas modales para la estructura aporticada regular de 10 pisos

Participación de masas modales par la estructura aporticada regular de 10 pisos			
Modos	Periodo (s)	Sum UX	Sum UY
1	1,13	0%	78%
2	1,07	77%	79%
3	0,93	79%	80%
4	0,36	79%	90%
5	0,35	90%	90%

4. Conclusiones

Del análisis modal espectral realizado con el espectro inelástico PEDERNALES (escalando el espectro de diseño de la Norma NEC-2015) se pudo concluir que las solicitaciones, derivas, cortantes basales y reacciones arrojadas no fueron similares al análisis no lineal tiempo-historia, lo cual indica que no es suficiente con escalar el espectro de diseño tomando como valor de Z la aceleración máxima producida superficialmente por el sismo de Pedernales.

De los análisis Modales Espectrales realizados se ha determinado que las mayores

solicitaciones en elementos estructurales, derivas, cortantes basales y reacciones en la base de la cimentación se han obtenido al utilizar el espectro de respuesta inelástico del registro de aceleraciones medido en Pedernales (SEISMOSIGNAL) en comparación al diseño basado en fuerzas (ESTÁTICO) o el espectro INELASTICO de la Norma NEC 2015 por cuanto la acción sísmica superficial es de 1,4 g. De las estructuras analizadas en el presente estudio se pudo evidenciar que las solicitaciones obtenidas del análisis modal espectral al utilizar el espectro de respuesta de Pedernales (SEISMOSIGNAL) son menores a las solicitaciones derivadas del análisis no lineal tiempo-historia (ACELEROGRAMA), este hecho indica que el factor de reducción de resistencia sísmica utilizado de 8, establecido en la norma Ecuatoriana NEC-15, es relativamente alto y no reproduce las solicitaciones derivadas de un análisis no lineal tiempo-historia.

Los incrementos de las derivas máximas inelásticas obtenidas entre los espectros inelásticos SEISMOSIGNAL y NEC-2015 determinó que la edificación de 2 pisos fue la más exigida con aumentos del 540 % en el eje X y de 620 % en el eje Y, superando el incremento en las edificaciones de 5 y 10 pisos que son de 300 % y 170 % en el eje X, y 330 % y 190 % en el eje Y respectivamente, mientras que las derivas máximas inelásticas obtenidas de los análisis no lineal tiempo-historia y NEC-2015 fueron de 350 % y 370 % en sentido X y Y, superando el incremento en las edificaciones de 5 y 10 pisos que son de 240 % y 180 % en el eje X, y 120 % y 100 % en el eje Y.

De acuerdo al criterio de Vision 2000, con el espectro de respuesta inelástico SEISMOSIGNAL tenemos un nivel de Desempeño de COLAPSO en las edificaciones de 2 y 5 pisos y PRE-COLAPSO en la edificación de 10 pisos, mientras con el análisis tiempo historia tenemos un nivel de Desempeño de PRE-COLAPSO en todas las edificaciones para el eje X el cual es el más crítico.

Otro parámetro analizado de importancia fueron las reacciones producidas

por las envolventes de diseño NEC-2015 y SEISMOSIGNAL, con el cual se determinó que la edificación de 2 pisos fue la más exigida con incrementos de 133 % en la carga axial (F_z) y los momentos M_x y M_y de 617 % y 482 % respectivamente.

Las reacciones producidas por las envolventes de diseño NEC-2015 y el análisis no lineal tiempo-historia en la edificación más exigida de 5 pisos produjo incrementos del 172 % en la carga axial (F_z) y de 622 % y 870 % en los momentos M_x y M_y respectivamente, superando de esta manera a las edificaciones de 2 y 10 pisos. El comportamiento anterior se atribuye a que el periodo fundamental de la estructura de 5 pisos es de 0,58 segundos, la cual coincide con el periodo predominante del sismo de Pedernales el cual se encuentra en un intervalo de periodos de 0,525 y 0,848 (segundos), efecto que produce amplificación de los valores de solicitaciones cuando existe compatibilidad entre el periodo de vibración natural de la estructura y el periodo predominante del sismo.

Este análisis de las reacciones es de gran importancia ya que da una idea clara de los diseños necesarios para resistir solicitaciones como el sismo de Pedernales, ya que si en este caso diseñáramos con las solicitaciones originadas por el análisis modal espectral NEC-2015, si actuara el sismo de Pedernales o incluso uno más severo, las estructuras podrían alcanzar derivas que superan el 2,5 % y llegar a la condición de colapso según lo establecido por visión 2000.

Basado en los estudios realizados previamente donde se analiza el factor de reducción de respuesta que deberían tener las estructuras aporricadas de hormigón armado [14], [15], [16] y [17], conjuntamente con los resultados obtenidos y derivados del presente trabajo, se sugiere revisar los valores de reducción de respuesta R indicados en la Norma NEC 2015, ya que se pudo evidenciar valores muy bajos de cargas axiales, cortantes y momentos que fueron superados en 1,7, 10,8 y 8,7 veces las solicitaciones del análisis modal espectral NEC-15 en relación al análisis no lineal Tiempo-Historia respectivamente, con

derivadas que superan el 2,5 % colocando a las estructuras en condición crítica de colapso.

Los parámetros z y R son de gran importancia al momento de realizar el espectro de diseño y con los valores actuales de $z = 0,5$ g y $R = 8$ se está reduciendo significativamente el espectro de diseño, disminuyendo las solicitaciones en la estructura y aumentando las derivas con relación al análisis no lineal tiempo-historia, lo cual se sugiere igualmente hacer una revisión del valor de z indicado en la norma ecuatoriana NEC-2015.

A nivel de cimentación, los incrementos en los valores de carga axial, corte y momento determinados en los análisis realizados al utilizar el sismo de Pedernales (tanto espectrales como tiempo-historia) en algunos casos superan el valor de 3 (ver tablas 14, 15 y 16), valor comúnmente utilizado como factor de seguridad en el diseño de cimentaciones, lo cual podría comprometer su desempeño tanto en la capacidad de soporte como a nivel de asentamientos indeseables, razón adicional que justifica la implementación de ajustes a los espectros de diseño de la norma ecuatoriana.

Es decir, en general las normas de diseño ante acciones sísmicas en edificaciones deberían incluir en sus análisis que cuando actúe el sismo más severo, no se supere la deriva de 2,5 % establecida como condición de colapso según visión 2000 y las solicitaciones a nivel de cimentación deberían tomarse para la condición previamente indicada a fin de no comprometer su capacidad de soporte o generar asentamientos indeseables.

Cabe destacar, como sugerencia, que los espectros de diseño contemplados en las normas sismo-resistentes no deberían ser superados en más de 3 veces como se evidencia en el presente estudio, a fin de garantizar que cuando actué el sismo más severo no se comprometa la estabilidad de la estructura.

Referencias

- [1] J. C. Singaicho, A. Laurendeau, C. Viracucha, M. Ruiz “Observaciones del 16 de abril de 2016 de magnitud Mw 7.8. intensidades y aceleraciones,” Área de Sismología, Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional.
- [2] Norma Ecuatoriana de la Construcción (2015) Cargas Sísmicas-Diseño Sismo Resistente: NEC-SE-DS.
- [3] Seismosoft – Seismosignal “Earthquake Engineering Software Products” Disponible: <https://seismosoft.com/product/seismosigna/>
- [4] Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C. “Amenaza Sísmica, Microzonificación Sísmica y Espectro de Diseño de la ciudad de Pedernales, Manabí, Ecuador.” Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/320433596_AMENAZA_SISMICA_MICROZONIFICACION_SISMICA_Y_ESPECTRO_DE_DISENO_DE_LA_CIUDDAD_DE_PEDERNALES_MANABI_ECUADOR/link/59e51904aca272390ed64286/download.
- [5] Analysis Reference Manual for Sap2000 CSI Bridge, 2016.
- [6] Instituto Geofísico “Formulario para solicitar los datos de los acelerógrafos de la RENGEO durante el sismo del 16 de abril de 2016” Disponible: <https://www.igepn.edu.ec/eq20160416-data>
- [7] A. López, A. Espín, G. Sánchez “Influencia del tipo de rótula plástica en el análisis no lineal de estructuras de hormigón armado” Universidad Politécnica de Cartagena, 2017
- [8] J. Aragadovay “Análisis Comparativo Utilizando el Método Tiempo – Historia con el Espectrograma del Sismo el Centro y la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015”.
- [9] Norma Ecuatoriana de la Construcción (2015) Hormigón Armado: NEC-SE-HA.
- [10] Norma Ecuatoriana de la Construcción (2015) Cargas no Sísmicas: NEC-SE-CG.
- [11] American Concrete Institute (2014) Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural: ACI-318S-14, A. C. EE-UU
- [12] Vision 2000 Committee and California Office of Emergency Services, Sacramento (SEAOC) “Conceptual framework for performance based seismic engineering of buildings,” USA, 1995.
- [13] R. Medina, J. Music “Determinación del nivel de desempeño de un edificio habitacional estructurado en base a muros de hormigón armado y diseñado según norma chilena,” Chile: Universidad Católica del Norte, 2018. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132018000100063
- [14] C. Alvarado “Estudio de de los Coeficientes de Reducción de Respuesta Estructural “R” de la Norma Ecuatoriana de la Construcción. 2015).
- [15] R. Aguiar “Factor de Reducción de las Fuerzas Sísmicas en Edificios de Hormigón Armado sin Muros de Corte. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/28502/MIS58.pdf>
- [16] L. Lasso, L. Pillajo “Influencia del Factor de Reducción de Resistencia Sísmica (R) en Edificaciones, Utilizando los Sistemas Constructivos: Dual Losas Postensadas-Muros y Tradicional Repositorio UPS, noviembre 2019.
- [17] D. Sequera, J. Vita “ Evaluacion del Factor de Reduccion de Respuesta en Sistemas Estructurales de Secciones Rectangulares y Lineas Resistentes con 5 y 6 grados de Inclinación no Ortogonales entre si” 2016, Disponible: <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/4921/Jose%20Sequera%2C%20Jos%C3%A9%20Vita.pdf?sequence=1>.

ANEXO A1

PERIODOS FUNDAMENTALES Y PARTICIPACIÓN DE MASA

EDIFICACIÓN DE 2 PISOS

TABLE: Modal Participating Mass Ratios Edificación de 2 Pisos														
Case	Mode	Period	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ	RZ/(Max UX;UY)	< 30% TRANSLACIONAL; >30% ROTACIONAL
		sec												
Modal	1	0,31	0,86	0,01	86%	1%	0,00	0,02	0,04	0,00	0,02	0,04	4%	TRANSLACIONAL
Modal	2	0,28	0,02	0,79	88%	80%	0,00	0,00	0,08	0,00	0,02	0,12	10%	TRANSLACIONAL
Modal	3	0,26	0,02	0,09	90%	89%	0,00	0,00	0,78	0,01	0,02	0,90	826%	TORSIONAL
Modal	4	0,22	0,00	0,01	90%	90%	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,90	54%	TORSIONAL
Modal	5	0,12	0,00	0,03	90%	93%	0,02	0,00	0,01	0,02	0,03	0,91	22%	TRANSLACIONAL
Modal	6	0,11	0,00	0,00	90%	93%	0,00	0,01	0,00	0,03	0,04	0,91	13%	TRANSLACIONAL
Modal	7	0,11	0,08	0,00	98%	93%	0,00	0,11	0,00	0,03	0,15	0,91	0%	TRANSLACIONAL
Modal	8	0,10	0,00	0,00	98%	93%	0,00	0,00	0,00	0,03	0,15	0,91	12%	TRANSLACIONAL
Modal	9	0,10	0,00	0,00	98,29%	94%	0,01	0,00	0,00	0,04	0,15	0,91	12%	TRANSLACIONAL
					CUMPLE	CUMPLE								
					DEBE SER MAYOR AL 90%									

CUMPLE

EDIFICACIÓN DE 5 PISOS

TABLE: Modal Participating Mass Ratios Edificación de 5 Pisos														
Case	Mode	Period sec	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ	RZ/(Max UX;UY)	< 30% TRANSLACIONAL; >30% ROTACIONAL
Modal	1	0,58	0,71	0,04	71%	4%	0,00	0,09	0,07	0,00	0,09	0,07	10%	TRANSLACIONAL
Modal	2	0,55	0,07	0,72	78%	76%	0,04	0,01	0,04	0,04	0,10	0,11	5%	TRANSLACIONAL
Modal	3	0,49	0,04	0,07	82%	83%	0,00	0,01	0,72	0,04	0,11	0,83	1035%	TORSIONAL
Modal	4	0,21	0,00	0,00	82%	83%	0,00	0,00	0,00	0,05	0,11	0,83	33%	TORSIONAL
Modal	5	0,19	0,09	0,01	92%	84%	0,01	0,29	0,01	0,05	0,40	0,84	9%	TRANSLACIONAL
Modal	6	0,18	0,01	0,08	93%	92%	0,13	0,03	0,01	0,18	0,43	0,84	7%	TRANSLACIONAL
Modal	7	0,16	0,00	0,01	93%	93%	0,02	0,01	0,09	0,20	0,45	0,93	805%	TORSIONAL
Modal	8	0,11	0,00	0,02	93%	95%	0,01	0,00	0,00	0,20	0,45	0,94	25%	TRANSLACIONAL
Modal	9	0,11	0,03	0,00	96%	95%	0,00	0,04	0,00	0,20	0,48	0,94	0%	TRANSLACIONAL
Modal	10	0,10	0,00	0,00	96%	95%	0,00	0,01	0,00	0,20	0,49	0,94	14%	TRANSLACIONAL
Modal	11	0,09	0,00	0,00	97%	95%	0,00	0,00	0,01	0,21	0,49	0,95	442%	TORSIONAL
Modal	12	0,09	0,00	0,02	97%	97%	0,01	0,00	0,00	0,22	0,50	0,96	18%	TRANSLACIONAL
Modal	13	0,09	0,00	0,00	97%	97%	0,03	0,00	0,00	0,25	0,50	0,96	573%	TORSIONAL
Modal	14	0,09	0,01	0,00	98%	98%	0,00	0,01	0,02	0,25	0,51	0,97	226%	TORSIONAL
Modal	15	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,01	0,00	0,00	0,26	0,51	0,97	77%	TORSIONAL
Modal	16	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,27	0,51	0,97	18%	TRANSLACIONAL
Modal	17	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,27	0,51	0,97	91%	TORSIONAL
Modal	18	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,01	0,00	0,00	0,27	0,51	0,97	13%	TRANSLACIONAL
					CUMPLE	CUMPLE								
					DEBE SER MAYOR AL 90%									

CUMPLE

EDIFICACIÓN DE 10 PISOS

TABLE: Modal Participating Mass Ratios Edificación de 10 Pisos														
Case	Mode	Period sec	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ	RZ/(Max UX;UY)	< 30% TRANSLACIONAL; >30% ROTACIONAL
Modal	1	1,13	0,00	0,78	0%	78%	0,11	0,00	0,02	0,11	0,00	0,02	2,173%	TRANSLACIONAL
Modal	2	1,07	0,77	0,00	77%	79%	0,00	0,18	0,02	0,11	0,18	0,03	1,977%	TRANSLACIONAL
Modal	3	0,93	0,02	0,02	79%	80%	0,00	0,00	0,77	0,11	0,19	0,80	4684,009%	TORSIONAL
Modal	4	0,36	0,00	0,10	79%	90%	0,30	0,01	0,00	0,42	0,20	0,80	3,859%	TRANSLACIONAL
Modal	5	0,35	0,11	0,00	90%	90%	0,01	0,42	0,00	0,42	0,62	0,81	1,418%	TRANSLACIONAL
Modal	6	0,31	0,00	0,00	91%	91%	0,01	0,01	0,10	0,43	0,63	0,91	3378,054%	TORSIONAL
Modal	7	0,21	0,00	0,00	91%	91%	0,00	0,00	0,00	0,43	0,63	0,91	13,452%	TRANSLACIONAL
Modal	8	0,20	0,00	0,03	91%	94%	0,03	0,00	0,00	0,46	0,63	0,91	7,733%	TRANSLACIONAL
Modal	9	0,20	0,04	0,00	94%	94%	0,00	0,07	0,00	0,46	0,70	0,91	1,501%	TRANSLACIONAL
Modal	10	0,18	0,00	0,00	95%	94%	0,00	0,00	0,03	0,46	0,70	0,95	1777,231%	TORSIONAL
Modal	11	0,14	0,00	0,02	95%	96%	0,04	0,01	0,00	0,50	0,71	0,95	14,493%	TRANSLACIONAL
Modal	12	0,14	0,02	0,00	97%	96%	0,01	0,05	0,00	0,51	0,76	0,95	0,061%	TRANSLACIONAL
Modal	13	0,12	0,00	0,00	97%	96%	0,01	0,00	0,02	0,52	0,76	0,97	964,112%	TORSIONAL
Modal	14	0,12	0,00	0,00	97%	96%	0,02	0,00	0,00	0,54	0,77	0,97	56,098%	TORSIONAL
Modal	15	0,11	0,00	0,00	97%	96%	0,10	0,01	0,00	0,63	0,78	0,97	43,616%	TORSIONAL
Modal	16	0,11	0,00	0,00	97%	97%	0,01	0,00	0,00	0,64	0,78	0,97	29,558%	TRANSLACIONAL
Modal	17	0,10	0,01	0,00	98%	97%	0,00	0,02	0,00	0,65	0,80	0,97	0,161%	TRANSLACIONAL
Modal	18	0,10	0,00	0,00	98%	97%	0,10	0,00	0,00	0,74	0,80	0,97	0,521%	TRANSLACIONAL
Modal	19	0,10	0,00	0,00	98%	97%	0,03	0,06	0,00	0,77	0,86	0,97	2,754%	TRANSLACIONAL
Modal	20	0,10	0,00	0,01	98%	98%	0,01	0,00	0,00	0,78	0,86	0,97	1,837%	TRANSLACIONAL
Modal	21	0,09	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,01	0,00	0,78	0,87	0,97	301,556%	TORSIONAL
Modal	22	0,09	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,78	0,87	0,97	148,034%	TORSIONAL
Modal	23	0,09	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,01	0,01	0,78	0,88	0,98	460,190%	TORSIONAL
Modal	24	0,09	0,00	0,00	98%	98%	0,05	0,01	0,00	0,83	0,88	0,98	123,333%	TORSIONAL
Modal	25	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,83	0,88	0,98	5,154%	TRANSLACIONAL
Modal	26	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,83	0,88	0,98	102,012%	TORSIONAL
Modal	27	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,83	0,89	0,98	4,344%	TRANSLACIONAL
Modal	28	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,83	0,89	0,98	6,484%	TRANSLACIONAL
Modal	29	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,83	0,89	0,98	723,751%	TORSIONAL
Modal	30	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,83	0,89	0,98	36,482%	TORSIONAL
Modal	31	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,01	0,01	0,00	0,84	0,89	0,98	0,556%	TRANSLACIONAL
Modal	32	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,00	0,00	0,00	0,84	0,89	0,98	55,083%	TORSIONAL
Modal	33	0,08	0,00	0,00	98%	98%	0,02	0,01	0,00	0,86	0,90	0,98	8,615%	TRANSLACIONAL

CUMPLE

CUMPLE CUMPLE
DEBE SER MAYOR
AL 90%